

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Měření přesnosti obrobených ploch na experimentálním dílu
obrobeném progresivní frézovací strategií

Measurement of Precision Machined Surfaces on the Experimental
Part Machined by Progressive Milling Strategies

Student:

Radek Vydra

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marek Pagáč

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Radek Vydra**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Měření přesnosti obrobených ploch na experimentálním dílu obrobeném
progresivní frézovací strategií**
**Measurement of Precision Machined Surfaces on the Experimental Part
Machined by Progressive Milling Strategies**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky měření přesnosti obrobených ploch.
2. Progresivní metody obrábění a jejich význam.
3. Metody měření přesnosti obrobených ploch na třísořadnicových měřicích strojích.
4. Návrh vhodné metody měření.
5. Zpracování naměřených údajů a vyhodnocení tolerančních odchylek.
6. Závěrečné hodnocení z hlediska přesnosti obrábění progresivními metodami obrábění.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007, s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina : EDIS Žilina, 2007, s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] WHITNEY, Daniel E. *Mechanical Assemblies : Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2004. 518. p. ISBN 0-19-515782-6.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Pagáč**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh
vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl
jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..19.5.2014.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 19.5.2014

.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Radek Vydra

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Jalubí 624, 68705

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VYDRA, R. *Měření přesnosti obroběných ploch na experimentálním dílu obroběném progresivní frézovací strategií: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 43 s. Vedoucí práce: Pagáč, M.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vytvoření náhledu na hlavní rozdíly standardních a vysoce efektivních frézovacích strategií vybraných CAM systémů. Tyto strategie byly předvedeny a použity na semináři v Bruntále u pěti experimentálních součástí pomocí CNC frézovacího stroje Quaser. Dalším cílem bylo seznámení se základními i pokročilými metodami měření přesnosti obroběného tvaru. Následný pokus o porovnání jednotlivých CAM systémů mezi sebou byl proveden na základě času obrábění experimentálních součástí a přesnosti povrchu měřeném na souřadnicovém měřicím stroji, který patří do vybavení laboratoří katedry obrábění a montáže.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VYDRA, R. *Measurement of Precision Machined Surfaces on the Experimental Part Machined by Progressive Milling Strategies: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 43s. Thesis head: Pagáč, M.

The main goal of this thesis was to develop insight into the main differences of standard and high efficient milling strategies in CAM systems. These strategies were demonstrated and used at a seminar in Bruntal in five experimental parts using CNC milling machine called Quaser. The following aim was to learn the basic and advanced methods of measurement of machined shape accuracy. The subsequent attempt to compare the various CAM systems among them was based on the time of machining experimental components and accuracy of surface measured using coordinate measuring machine that belongs to the equipment of the laboratories of the Department of Machining and Assembly.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	8
Úvod	9
1. Současný stav a jeho rozbor.....	10
2. Návrh experimentálních částí bakalářské práce.....	13
2.1 Výběr CAM systémů.....	13
2.2 Vlastní návrh experimentálního dílce	14
2.3 Polotovar	15
2.4 CNC obráběcí stroj.....	15
2.5 Frézovací nástroje	16
2.6 Upínače nástrojů.....	17
2.7 Měření geometrické přesnosti	18
3. Vysoce efektivní technologie frézování	19
3.1 Aspekty a efekty vysoce efektivních strategií.....	19
3.2 Princip technologie vysoce efektivního frézování	19
3.3 Komparace konvenčního a vysoce efektivního frézování	20
3.4 Druhy technologií vysoce efektivních frézovacích strategií.....	20
4. Základní metody měření obrobených ploch	25
5. Měření přesnosti na třísouřadnicových měřicích strojích.....	26
5.1 Třísouřadnicové měřicí stroje	27
5.2 Metody měření	28
5.2.1 Měření rozměrů vnějších a vnitřních.....	29
5.2.2 Měření úchylny tvaru a polohy	30
5.3 Stanovení vhodné metody měření.....	32
6. Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení.....	33
6.1 Měřené plochy obrobku	33
6.2 Naměřené hodnoty	34
6.3 Vyhodnocení naměřených hodnot.....	36
Závěr	40

Seznam zkratek a symbolů

Zkratky	Popis
CAM	Computer aided manufacturing – počítačem podporovaná výroba
CAD	Computer Aided Design – počítačem podporované navrhování
NC	Numerical Control – číslicové ovládání (zejména obráběcích strojů)
CNC	Computer Numerical Control – počítačový řídicí systém
SMS	Souřadnicové měřicí stroje
HRC	Tvrdost dle RockWella
Ra	Drsnost povrchu [μm]
ČSN	Česká technická norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
EN	Evropská norma
CCD	Charge-Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
Si	Křemík
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Síra
Cr	Chrom
Mo	Molybden
V	Vanad

Úvod

V současné době jsou v oboru třískového obrábění kladeny stále větší požadavky. Tyto nároky se týkají zejména vyšších přesností obráběných součástí, kvality opracování a časem obráběcích cyklů. Bez nepřetržitého vývoje nových řezných materiálů, kvalitnějších obráběcích strojů a celkové výrobní strategie by tyto požadavky nebylo schopno plnit.

Jeden z trendů současné doby je také přechod z konvenčních na progresivní možnosti obrábění, zefektivnění hrubovací strategie, které jsou založeny na principu optimalizace úhlů záběru frézy po celou dobu obrábění, na snaze o využití celé řezné části frézovacího nástroje a na kontinuální dráze. Jelikož jde o využití těchto požadavků na počítačově řízené stroje, výsledek závisí na programování. To vede k vývoji nových počítačem podporovaných výrobních systémů CAM. Vzhledem k tomu, že takovýchto druhů softwarů již máme na trhu několik, byla jedna z částí mé bakalářské práce náhled na osm nejznámějších v oblasti problematiky docílení progresivního frézování.

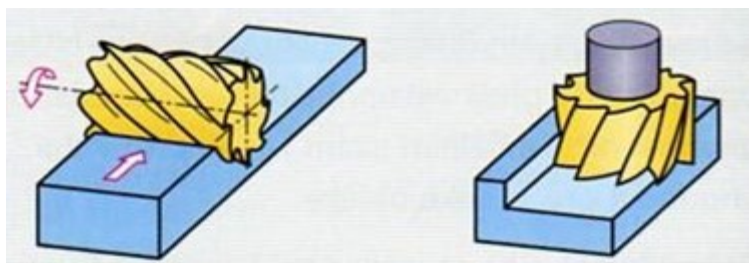
Následné zhodnocení se primárně nevztahuje na strojní časy, protože možné kratší doby mohou ovlivnit trvanlivost nástroje. Vztahují se na možnou závislost použitého systému a frézovací strategie na geometrické přesnosti ploch na vytvořených experimentálních kusech. Pro naměření adekvátních hodnot tohoto typu existuje několik druhů měřících přístrojů. Pro účely této práce byl využit třísouřadnicový měřicí stroj, který je díky možnostem způsobů měření popsán i v jedné z částí této práce.

1. Současný stav a jeho rozbor

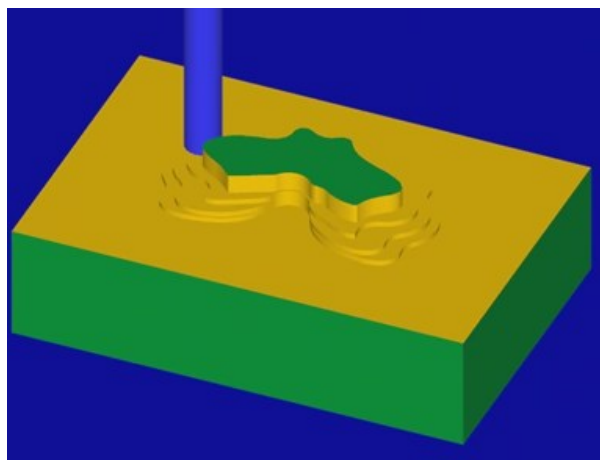
Strategie obrábění mají ve své podstatě různé interpretování. Jsou rozlišovány dva základní typy strategií, geometrické a technologické strategie. Pokud chceme docílit přesunutí z místa A do místa B, nastane otázka, jakým způsobem to provedeme (jakou geometrickou strategii zvolíme). Jakmile je určena, je důležité rozhodnout o způsobu přepravy resp. dopravního prostředku pro překonání této cesty (výběr řezného nástroje) a jak jej použijeme (volba řezných podmínek) což je strategie technologická. [4]

Použitím vhodných kombinací strategií obrábění lze dosáhnout snížení času obrábění, zvýšení životnosti nástroje, zlepšení kvality povrchu a v neposlední řadě také ovlivnit rozměrovou přesnost obrábění. Je zřejmé, že zvolená strategie má velký vliv na výsledky obrábění, jakost obrobku a tedy také na ekonomické aspekty výroby. [1]

Ze základních geometrických strategií existuje spousta metod, kterými lze nástroj při frézování posouvat. Například rovinné frézování (viz obr. 1.1), kdy směr posuvu je přímá čára, tvarové kde směr posuvu je křivka, kruhové, nebo po vrstvách (viz obr. 1.2). [4]



Obr. 1.1 Obvodové a čelní rovinné frézování [1.1]

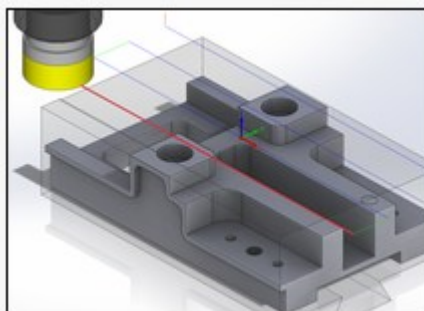


Obr. 1.2 Frézování po vrstvách [1.2]

Rozdělení frézovacích strategií a obráběcích cyklů v CAM systémech není obecně definováno, protože se liší počtem os. Pro 2,5-osé obrábění se může nástroj pohybovat ve dvou směrech současně. (např. X a Y) a pohyb v další ose (např. Z) je omezen jen na nastavení pevné úrovně. [4]

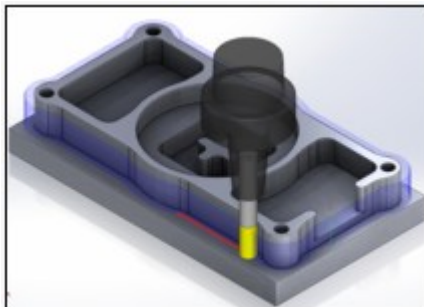
Základní obráběcí cykly pro frézování 2,5-osé jsou například:

- Frézování rovinných a čelních ploch, které slouží k odebrání materiálu z rovinné oblasti obrobku.



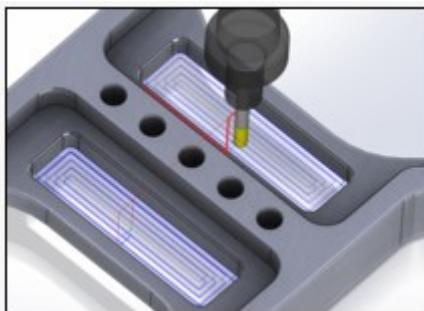
Obr. 1.3 Frézování čelních ploch [1.3]

- Frézování profilu a osazení pro obrábění otevřených a uzavřených regionů tak, že se nástroj pohybuje podél jedné strany jejich kontury.



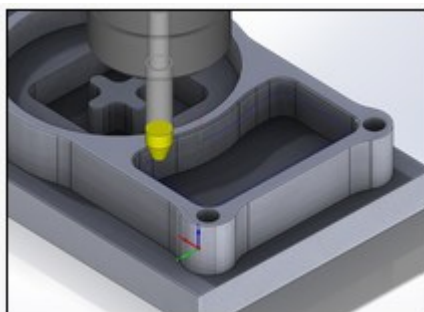
Obr. 1.4 Frézování kontury [1.3]

- Frézování kapes jde v CAM systémech provést mnoha způsoby. Záleží na použitém frézovacím cyklu, který zadává jeho trajektorii (např. jednosměrně, do středu nebo cik-cak)



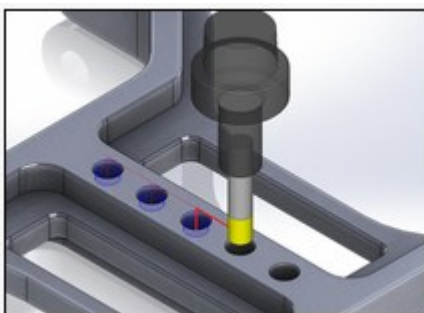
Obr. 1.5 Frézování kapsy do středu [1.3]

- Frézování sražení (ohraňování) slouží ke sražení hran na solid modelech.



Obr. 1.6 Frézování sražení [1.3]

- Obrábění otvorů může představovat buď jen vrtání otvorů, nebo komplexní souhrn operačních úseků složených z navrtání otvoru, předvrtání, vrtání, zahloubení atd. Obrábění děr má většina CAM systému dobře zpracována.



Obr. 1.7 Frézování otvorů [1.3]

- Gravírování se používá především k frézování textu, kde zadávanou geometrií pro určení místa odebíraného materiálu je textový prvek.



Obr. 1.8 Gravírování [1.3]

Je zřejmé, že zvolená strategie má velký vliv na výsledky obrábění. Současné CAD/CAM systémy nabízejí řadu funkcí a vylepšení, které přispívají ke zvyšování jakosti obrábění. Část práce je tedy zaměřena na hodnocení kvality obrobeneho povrchu na pěti obrobených součástech pomocí různých CAD/CAM systémů. [7]

2. Návrh experimentálních částí bakalářské práce

Jedná se o experiment za konstantních podmínek (stejný stroj, nástroj, obrobek, řezné podmínky), pouze jiný CAM.

2.1 Výběr CAM systémů

V dnešní době zaujímá výpočetní technika v konstrukčním procesu (CAD systémy) a řízení CNC technologií (CAM systémy) nezpochybnitelně místo při výrobě a konstrukci. Celosvětový rozvoj a působnost těchto systémů je úměrný jejich důležité roli ve výrobním procesu.

Důležitá je kvalifikovaná obsluha stroje a osoba technologa programátora, který je schopen připravit kvalitní programy. Rychlost a kvalita zaškolení závisí na zvoleném CAD/CAM systému. Ten by měl být uživatelsky nenáročný, přehledný, snadno ovladatelný a intuitivní. [4]

Kvalitní CAD/CAM systémy se snaží o přizpůsobení jak k uživateli, tak nově vznikajícím trendům v obrábění například právě k vysoce efektivním obráběcím strategiím. Na trhu jsou desítky CAD/CAM systémů zaměřené v oblasti třískového obrábění kovů. Tyto systémy jsou pro svou širokou škálu použití opatřeny nastavbami pro různé nově vznikající obráběcí strategie.

Výběr CAM systému pro obrobení progresivní strategií pěti experimentálních kusů byl proto zaměřen na CAM systémy, které tuto modulární nastavbu obsahují.

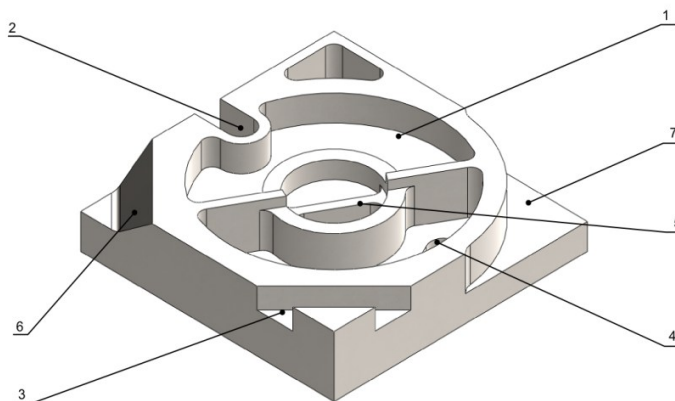
- **EdgeCAM** – Je CAM systém, umožňující programování jak frézovacích a soustružnických stojů, tak i řešení pro výrobu tvarových forem a zápustek.
- **FeatureCAM** - Delcam FeatureCam je samostatný CAD/CAM software pro podobné uplatnění v oblasti programování frézovacích center a soustruhů jako EdgeCAM.
- **SolidCAM** – Je plně integrovaný CAM systém v prostředí CAD systému SolidWorks. SolidCAM, jako zásuvný modul, poskytuje funkce pro definování obráběcích operací, pro simulaci a kontrolu obrábění a pro generování CNC programu.

- **SurfCAM** – Představuje vyspělý CAM systém pro řízení CNC technologií umožňující řídit 2 a 5 osé obráběcí centra od frézek, vyvrtávaček až po drátořezy.
- **WorkNC** – Uživatele tohoto systému můžeme najít jak v průmyslu automobilovém, leteckém, strojírenském, tak i v oblasti výroby nástrojů a forem, ale i ve zdravotnictví.

2.2 Vlastní návrh experimentálního dílce

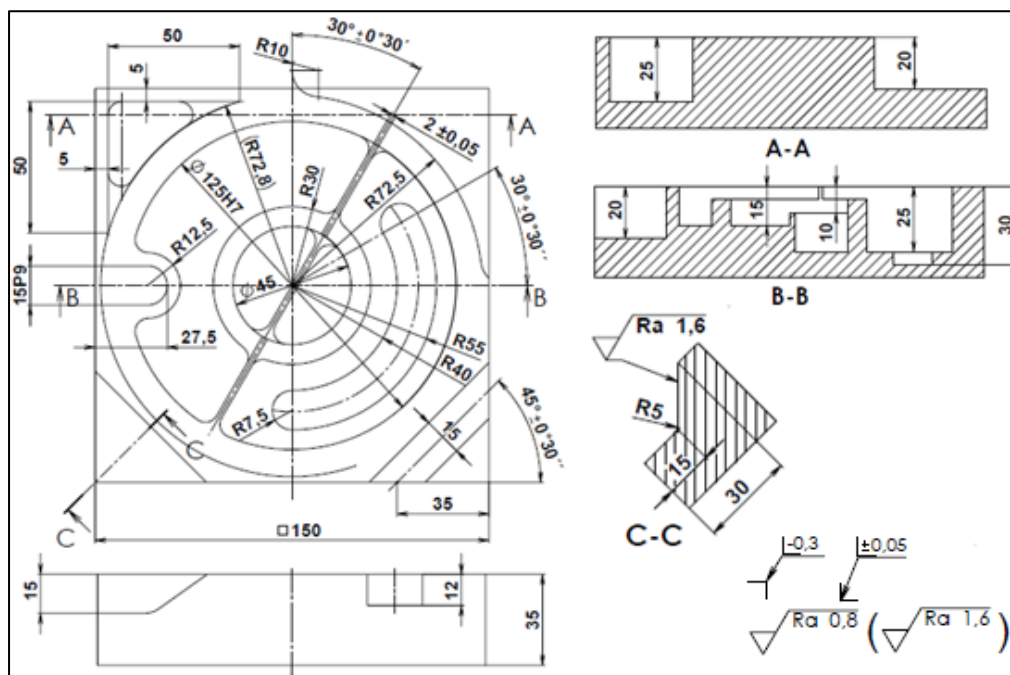
Návrh materiálu polotovaru a požadovaného výsledného tvaru obrobku bylo provedeno vedoucím bakalářské práce Ing. Markem Pagáčem. Základním faktorem návrhu experimentálního dílu je obsah otevřené a uzavřené kapsy, na které se frézovací strategie aplikují (viz obr. 1.9).

1. vnitřní kruhová kapsa
2. drážka rovnoběžná s osou x
3. drážka vychýlená
4. drážka tvaru oblouku
5. tenkostěnné žebro
6. šikmá plocha
7. boční otevřená kapsa



Obr. 1.9 Model experimentálního dílu [1.4]

K tomu, aby tyto obrobené díly bylo možné hodnotit z hlediska výrobní přesnosti, byly zadány tolerované rozměry ploch a drsnost povrchu (viz obr. 2). [7]



Obr. 2 Část výkresové dokumentace [1.4]

2.3 Polotovár

Jako vhodný materiál pro tyto frézovací strategie byla zvolena nástrojová ocel velikosti 150x150x35. Ocel je značena 1.2342/1.2344 dle normy DIN EN ISO a ČSN 19 554, která je známá pod obchodním názvem Toolox44. Záměrem použití této kalené a popouštěné oceli je její dobrá obrobiteľnosť díky její houževnatosti přesto, že její tvrdost se pohybuje od 41 do 47 HRC. Dalším příznivým aspektem je její dobrá rozměrová stálost díky tomu, že je vyráběna s nízkým zbytkovým pnutím. Chemické značení oceli je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení oceli Toolox44 [1]

C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo	Ni	V	Misc
0,31	0,60	0,90	0,010	0,004	1,35	0,80	0,70	0,145	B 0,002

Využití této oceli je např. pro formy na plastické hmoty, gumárenské lisovací formy, lisovací nástroje a nástroje pro tváření plechu kvůli dosahování dobrých výsledků při leštění.

2.4 CNC obráběcí stroj

Experiment se uskutečnil na vertikálním obráběcím CNC stroji Quaser MV 184E (viz obr. 2.1), který je schopen plnit základní požadavky. Těmi jsou maximální výkon a vysoká variabilita provedení společně s vysokou tuhostí skeletu, což zlepšuje

přesnost výroby prakticky pro neomezenou dobu. Stroje jsou ovládány pomocí řídicího systému Heidenhain TNCi530. Bližší informace jsou uvedeny v tabulce níže.

Tab. 2 Specifikace stroje [2]

Parametr	jednotky	QUASE MV 184E
Pracovní stůl	[mm]	1200 x 1600
Zatížení stolu	[kg]	500
Pojezd v ose X	[mm]	1020
Pojezd v ose Y	[mm]	610
Pojezd v ose Z	[mm]	610
Výkon hlavního motoru	[kW]	15
Vysokotlaké chlazení	[bar]	8/20/50
Kapacita zásobníku	[ks]	30/48/60
Hmotnost stroje	[kg]	6700
Otáčky vřetena	[min-1]	10000/12000/15000/25000
Kužel ve vřeteni		ISO 40/BT40
Způsob pohonu vřetena		lineární motor

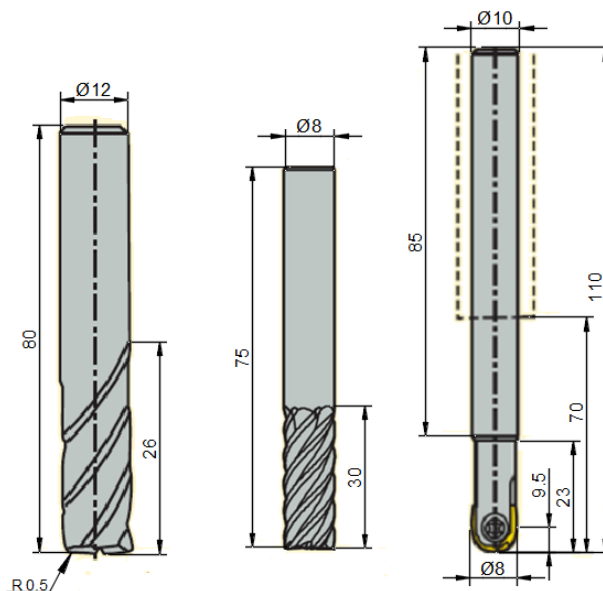


Obr. 2.1 Obráběcí centrum Quaser [1.5]

2.5 Frézovací nástroje

Ve výrobě forem a zápusťek je stejně jako pro naši potřebu často nutno frézovat hluboké vybrání. V úvahu zde přicházejí monolitní karbidové frézovací nástroje (viz obr. 2.2) a stopkové frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami. V závislosti na tvaru návrhu, který obsahuje drážky, kapsy a zkosené hrany různých velikostí byly použity tři nástroje společnosti SECO:

- Monolitní hrubovací karbidová čtyřbřitá stopková fréza průměru 12 mm s úhlem čela 8° a 48° úhlem sklonu šroubovice.
- Monolitní dokončovací karbidová šestibřitá stopková fréza průměru 8 mm s úhlem čela 7° a 45° úhlem sklonu šroubovice.
- Kopírovací kulová fréza s výměnnými břitovými destičkami průměru 8 mm.



Obr. 2.2 Použité obráběcí nástroje [1.6]

2.6 Upínače nástrojů

Na základě tvaru kužele ve vřetení (ISO 40) stroje Quaser a válcových stopek všech tří nástrojů byly zvoleny nesamosvorné upínací trny typu Weldon (viz obr. 2.3), které jsou vhodné právě pro využití pro maximální hloubky záběru v axiálním i radiálním směru.



Obr. 2.3 Upínací trn Weldon [1.7]

2.7 Měření geometrické přesnosti

Přesnosti obrobených dílů byla měřena pomocí třísouřadnicového měřicího stroje Wenzel LH65 X3M (viz obr. 2.4) s měřicí hlavou PH10M a sondou TP200 (viz obr. 2.5).



Obr. 2.4 Měřicí stroj Wenzel [1.8]



Obr. 2.5 Měřicí hlava se sondou [1.8]

Tento typ SMS je konstruován portálovou metodou s rozsahem měření 800 x 1500 x 700 mm a nosností max. 1100kg.

Rozměrová kontrola byla prováděna dle zadané výkresové dokumentace (viz obr. 2) kde cílem bylo srovnání rozměrů naměřených a zadaných v CAD 3D modelu.

3. Vysoce efektivní technologie frézování

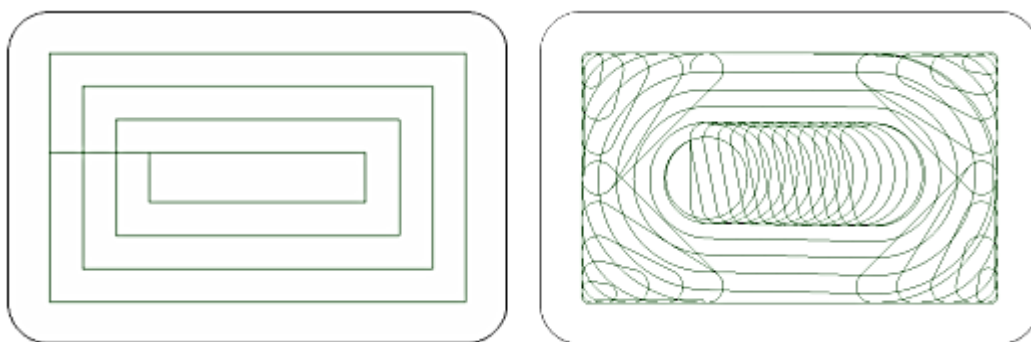
3.1 Aspekty a efekty vysoce efektivních strategií

Progresivní technologie zahrnuje širokou škálu procesu, které se využívají k úběru materiálu. Především pro materiály běžným mechanickým způsobem hůře obrobitelné (např. kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní keramické materiály, některé polymery, plastické hmoty, silikony a kovové materiály s vynikajícími užitými vlastnostmi (koroziivzdorná ocel, lamináty, atd.) Problémy vznikající při obrábění takovýchto materiálů vyplývají z jejich materiálových charakteristik, jako je např. vysoká tvrdost, křehkost, žáruvzdornost, nevhodné tepelné vlastnosti, chemická reaktivita s řezným nástrojem, nehomogenní mikrostruktura apod. Dle mechanismu úběru materiálu lze nekonvenční metody dělit na mechanické, chemické, elektrické, elektrochemické nebo tepelné procesy. [9]

Jednou ze základních charakteristik progresivní technologie je automatizace výroby. Jedná se o zefektivnění informačního toku ve výrobním procesu, redukuje výrobní časy, snižuje výrobní náklady atd. Tento aspekt účinně působí při použití NC a CNC strojů a zavádění CAD/CAM systémů do výroby. [5]

3.2 Princip technologie vysoce efektivního frézování

Progresivní strategie obrábění z hlediska mechanického procesu (soustružení, frézování, atd.) využívají počítačem řízené CNC obráběcí stroje, na kterých se tato problematika řeší při programování drah nástroje (viz obr. 2.6).



Obr. 2.6 Porovnání dráhy efektivní a standartní metody obrábění [1.9]

Jsou to nové metody opracovávání materiálů až dnešní doby protože to dříve nedovolovaly jak výkonnostní parametry strojů, tak ani mechanické vlastnosti

nástrojů. Mezi klíčové faktory ovlivňující tři základní směry obráběcího procesu (rychlost, přesnost, kvalita povrchu) bezpochyby patří všechny prvky soustavy SNOP.

3.3 Komparace konvenčního a vysoce efektivního frézování

Obrábění je takový pracovní proces, při kterém polotovar dostává požadovaný tvar a rozměr finální strojní součástky obráběním materiálu z povrchové vrstvy. Základní podmínkou progresivního obrábění je naprostá převaha požadovaných fyzikálních vlastností materiálu řezného nástroje nad materiálem obráběným. Obecně lze předpokládat, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky i intenzitou tření třísky o nástroj. [2]

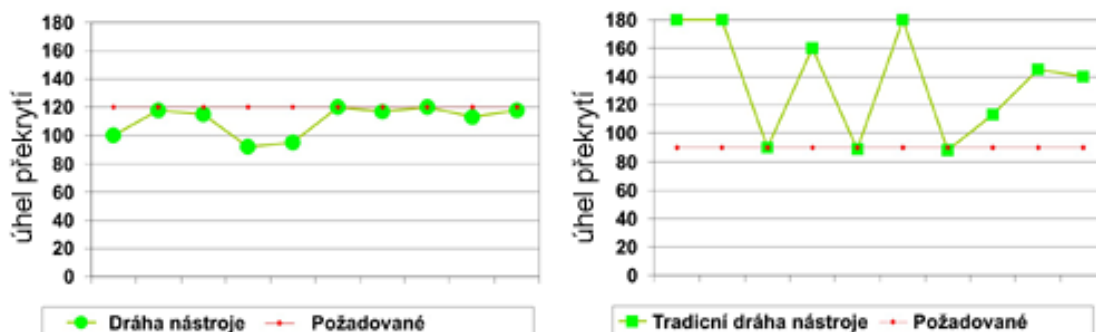
Při klasickém obrábění dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky, které vede k jejímu ztvrdnutí oproti původnímu stavu. Díky tomu, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny. [2]

Vysokorychlostní obrábění realizované zvláště výkonnými, mimořádně tvrdými a tepelně odolnými řeznými nástroji, probíhá při teplotě blízké tavné teplotě obráběného materiálu. Dochází k náhlým změnám metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky. Tříska sníží svou přitlačnou sílu na čelo nástroje. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou. Vyšší teplota třísky je tedy pozitivním faktorem třískového obrábění a chlazení místa obrábění na rozdíl od konvenční technologie není zpravidla nutné. Následné zvyšování řezné rychlosti nevede k zvláště výraznému opotřebení nástroje, vede však k výraznému zkrácování strojního času obrábění. [5]

3.4 Druhy technologií vysoce efektivních frézovacích strategií

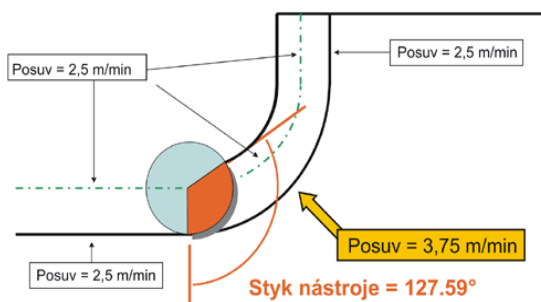
Frézování je strojní třískové obrábění kovů vícebřitým nástrojem, kde hlavní pohyb (rotační) koná nástroj (fréza) a vedlejší (přísuv) obrobek. Klasicky probíhá ve třech osách. Jako ve všech odvětvích tak i v oblasti frézování dochází k inovacím a to jak z hlediska stroje a nástroje, tak v oblasti software jako jsou CAM systémy. Dřívější konvenční možnosti frézování nabízely pouze klasické metody obrábění. Například obrábění výsledného tvaru obrobků frézováním po jednotlivých vrstvách, ve kterých

se nevyužívalo celé délky řezné části nástroje s častým přerušováním řezného cyklu. Progresivní obrábění tohoto typu je spojeno s maximálním odběrem materiálu v co nejkratším čase a slouží k optimalizaci úhlu záběru na celé délce řezné části nástroje (viz obr. 2.7), přičemž šetří jeho životnost. [6]

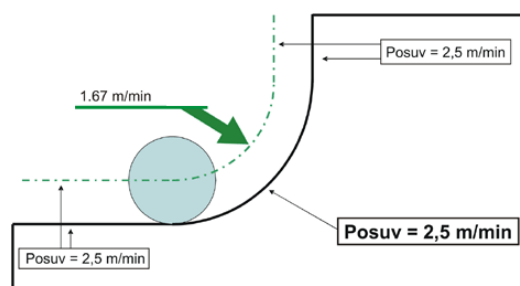


Obr. 2.7 Porovnání efektivní a standardní metody obrábění [2]

Za pomoci efektivních strategií se například při frézování kapsy nejprve frézuje požadovaná hloubka a následně v maximální přípustné hranici délky řezné části nástroje její tvar. Proces obrábění se tak nepřerušuje a zůstává kontinuální (viz obr. 2.). [8]



Obr. 2.8 Standartní způsob posuvů [2.1]



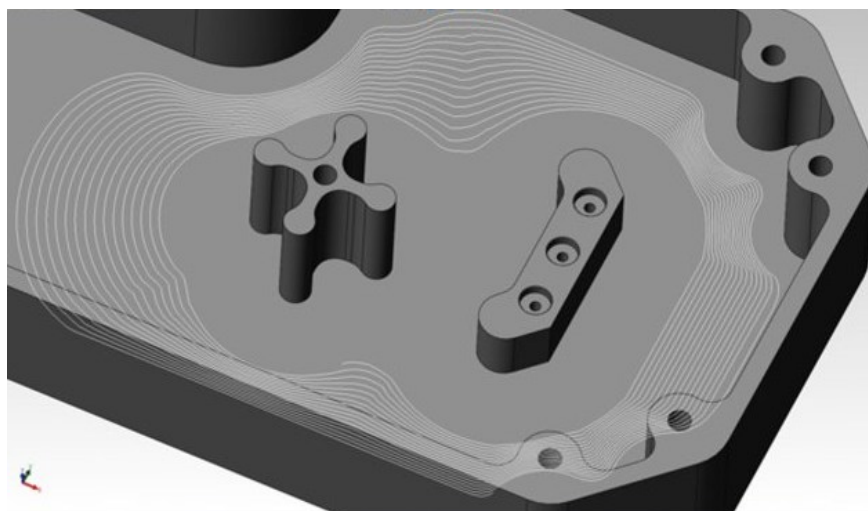
Obr. 2.9 Kontinuální dráha [2.1]

Jde o proces, ve kterém si CAM systém vytváří jedinečnou dráhu nástroje, která odstraňuje nežádoucí šoky, působících při náhlých změnách pohybu a při obrábění vnitřních hran. Ve standardních technologiích se v takových místech úhel styku nástroje s materiálem zvětší a zvýší se i efektivní posuv, což může mít za následek poškození nástroje. Výsledný rozdíl obrobených použitím standardní a efektivní strategie je vidět na obrázcích níže.



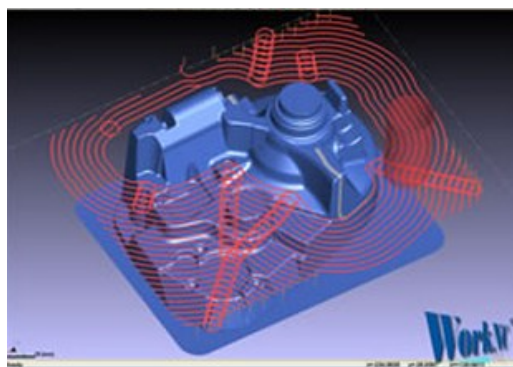
Obr. 3 Rozdíl obrobených ploch [2]

SolidCAM pro svou strategii použil modul iMachining. Základním cílem strategie iMachiningu je navržení ideálních řezných podmínek (především úhel opásání nástroje) a tyto pak aplikovat po celou dobu řezu nástroje. Výsledkem tohoto výpočtu jsou dráhy nástroje s konstantním průřezem třísky. Na rozdíl od jednoduché spirální dráhy nástroje využívá iMachining morfující spirály, které postupně sledují geometrii obráběného prvku a maximalizují tak čas záběru (viz obr. 3.1).

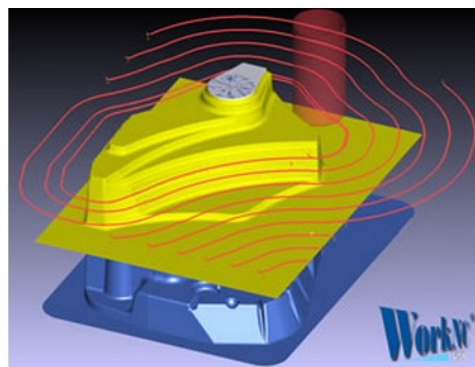


Obr. 3.1 Morfující spirály obráběné trajektorie [2.2]

WorkNC vyniká hlavně jednoduchostí obsluhy. I progresivní strategie tímto softwarem pro 2D až 5ti-osé obrábění přináší efektivní dráhy obrábění díky možnosti výběru z několika strategií, které zvyšují produktivitu. Těmi jsou například velkoobjemové hrubování, adaptivní trochoidní hrubování (viz obr. 3.2) nebo spirálové hrubování kolem ostrůvků (viz obr. 3.3).

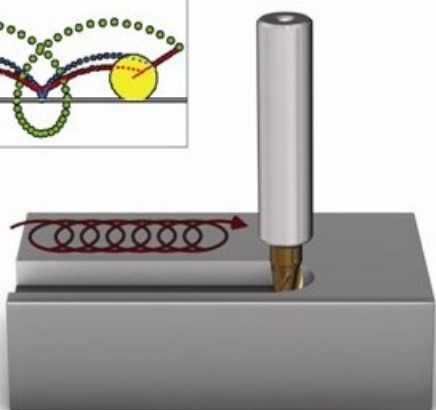
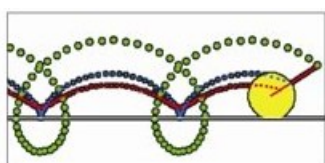


Obr. 3.2 Trochoidní strategie [2.3]

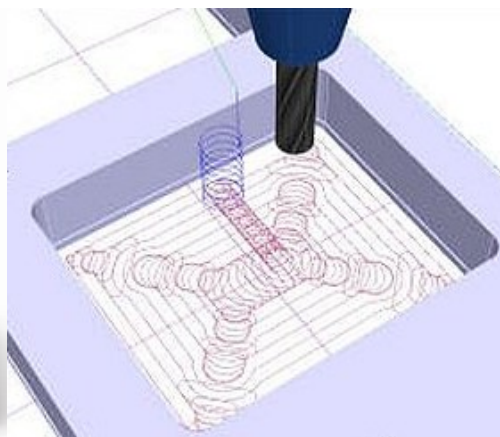


Obr. 3.3 Spirálové hrubování [2.3]

FeatureCAM uplatil pro snahu o progresivní hrubovací strategii modulární nastavbu Vortex, který umožňuje naplánování obrábění tak, aby v co nejkratším čase došlo k maximálnímu odběru materiálu, přičemž se využívá celé délky nástroje s konstantním úhlem záběru. Trajektorie frézování pak připomíná trochoidu (viz obr. 3.4). [4]

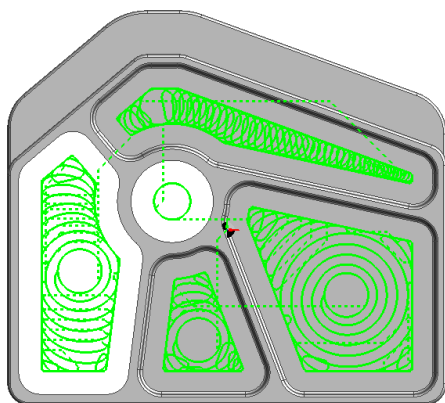


Obr. 3.3 Trochoidní trajektorie [2.4]

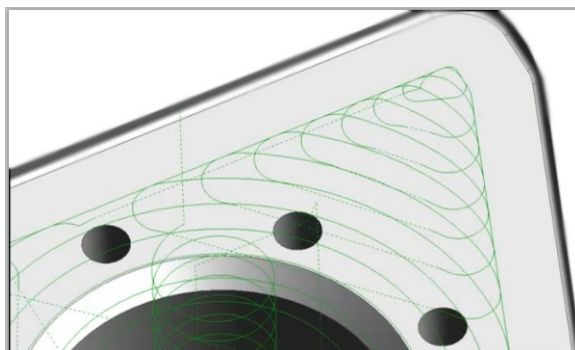


Obr. 3.4 Trajektorie strategie Vortex [2.5]

EdgeCAM užil vysoce efektivní hrubovací proces pomocí strategie Waveform. Pomocí této „vlnové“ strategie (viz obr. 3.5) jsou zajištěny konstantní řezné podmínky, vyšší stabilita a plynulý vzor drah nástroje, který umožňuje zkrácení dob cyklů a zlepšení životnosti nástroje. Díky této metodě jsou řešeny i problémy týkající se přetížení nástroje (frézy) při obrábění rohů (viz obr. 3.6).

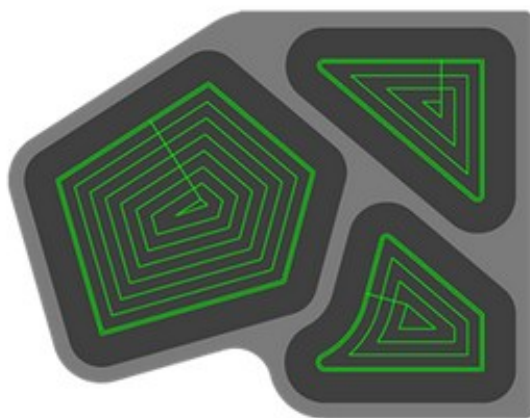


Obr. 3.5 Trajektorie Waveform [2.6]

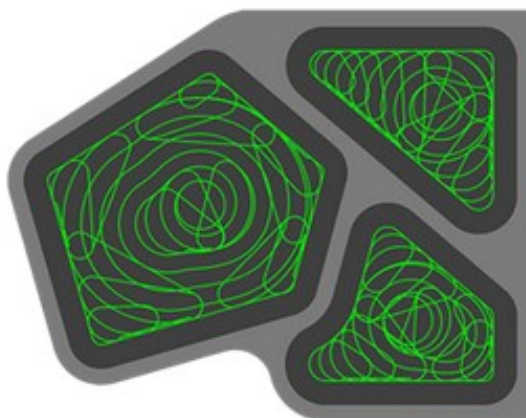


Obr. 3.6 Detail trajektorie obrábění rohů [2.7]

SurfCAM pro svou progresivní technologii používá strategii TrueMill. Tato možnost stejně jako u konkurenčních verzí přizpůsobuje dráhu nástroje tak, aby úhel styku nástroje s materiálem nepřekročil maximálně povolenou hodnotu. Všechny rohy a ostré změny směru v dráze nástroje jsou odstraněny (viz obr. 3.8).



Obr. 3.7 Standartní trajektorie [2.8]



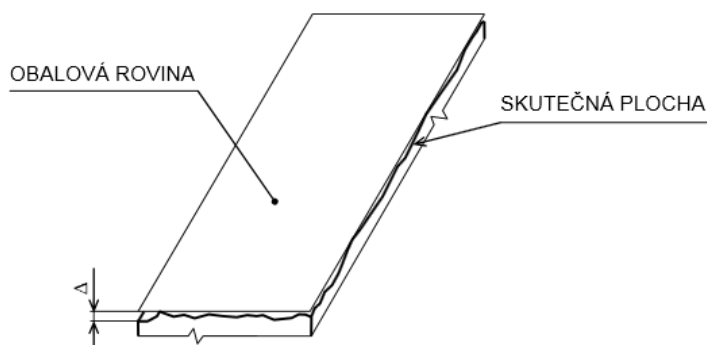
Obr. 3.8 Trajektorie TrueMill [2.8]

4. Základní metody měření obrobených ploch

Parametry přesnosti a kvality posuzované obrobené plochy se konkretizují jako parametry přesnosti, k nimž patří následující úchyly:

- struktura povrchu – průměrná aritmetická úchylka R_a ,
- úchylka rozměru – úchylka od jmenovité hodnoty,
- úchylka tvaru – úchylka přímosti, kruhovitosti, válcovitosti,
- úchylka polohy – úchylka rovnoběžnosti, kolmosti, souososti,

V některých případech se mohou kvantifikovat další parametry jako druh a velikost napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy a mikrotvrdost povrchové vrstvy. Přesnost obrobené plochy je obecně funkcí přesnosti a technologických vlastností obráběcího stroje, nástroje, obrobku, upínače a řezných podmínek. [1]

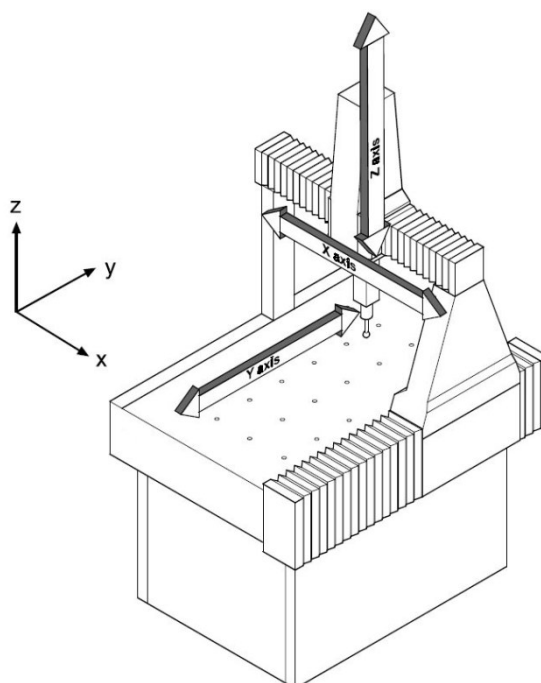


Obr. 3.9 Rozdíl skutečného a přesného tvaru [2.9]

5. Měření přesnosti na třísouřadnicových měřicích strojích

Souřadnicové měřicí přístroje představují jednu z nejvýznamnějších inovací v oblasti měření ve strojírenství. Konstrukce souřadnicových měřicích přístrojů byla vynucena potřebou měření karoserií v automobilovém a leteckém průmyslu a potřebou měření u NC strojů ve strojírenské výrobě.

Princip souřadnicového měření spočívá v tom, že stanovíme základní bod v prostoru a polohy dalších bodů na měřené součásti měříme formou souřadnicových rozměrů v osách X, Y, Z (viz obr. 4). Možnost určení základního bodu v kterémkoliv místě pracovního prostoru měřicího stoje je velkou výhodou oproti konvenčním metodám. [3]



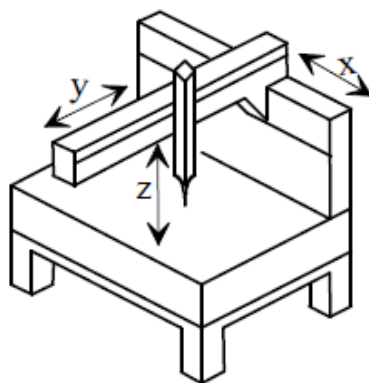
Obr. 4 Polohy os na třísouřadnicovém měřicím stroji [3]

Ve srovnání s tradičními způsoby měření, kde odečítání naměřených hodnot z jemných stupnic je nejen zdlouhavé, ale i namáhavé, představuje číslicový způsob vyhodnocení výsledků u souřadnicových měřicích strojů značný krok vpřed. Mimo to je většina (SMS) uzpůsobena tak, že je možno k nim připojit zařízení pro záznam naměřených hodnot, které automaticky registruje naměřené body. [3]

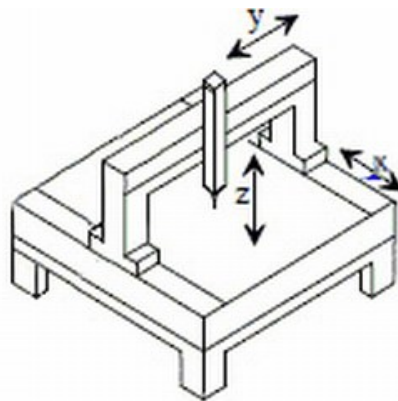
5.1 Třísouřadnicové měřicí stroje

Souřadnicově měřících strojů je více druhů a mohou být uspořádány podle potřeby do skupin na základně různých hledisek. Snaha o maximální přístupnost do měřicího prostoru ovlivnila řešení SMS tak, že se dnes používají v podstatě tato konstrukční uspořádání:

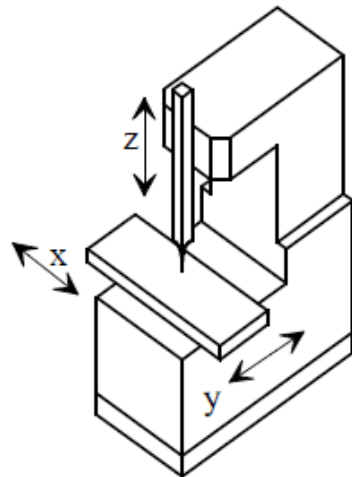
- mostové,
- výložníkové,
- portálové,
- typu vodorovných a svislých souřadnicových vyvrtávaček.



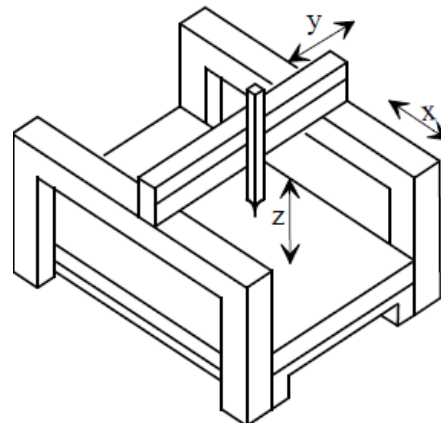
Obr. 4.1 Výložníkový SMS [3]



Obr. 4.2 Mostový SMS [3]



Obr. 4.3 Sloupový SMS [3]



Obr. 4.4 Portálový SMS [3]

Nejrozšířenější je typ konstrukce mostové (viz obr. 4.2). Díky velké tuhosti stroje a velkou kapacitou měřicího prostoru jsou proto jedny z nejrozšířenějších a i tento typ SMS byl využit pro měření součástí vytvořených progresivním frézováním.

5.2 Metody měření

Trojrozměrná kapacita SMS umožňuje měření současně na pěti stránkách při jednom ustavení na měřicím stole. To je velmi důležité pro většinu strojírenských výrobků. Měřicí rozsah SMS je dán hodnotami jednotlivých souřadnic X, Y, Z. Je to prostor, který při měření dosáhne měřicí hlavy. [3]

SMS je možno používat pro měření jednotlivých bodů součástí, pro spojitě snímání tvarů a tako pro spojitou kontrolu úchylek tvaru křivek. Ve všech případech je možno volit různé způsoby pohybu měřicí hlavy a různé provádění měření. Základním krokem SMS je určení polohy snímaného bodu v souřadnicové soustavě měřicího stroje, tj. stanovení souřadnic tohoto bodu. [3]

Geometrických prvků, které lze na SMS kontrolovat je celá řada. Pro měření na frézovaných součástech používáme např. poloha středu kružnic, šířka drážky, úhel kruhovitosti, úhel dvou ploch nebo souřadnice bodu v rovině.

Do základního rozdělení druhů měřicích metod využívaných na SMS patří:

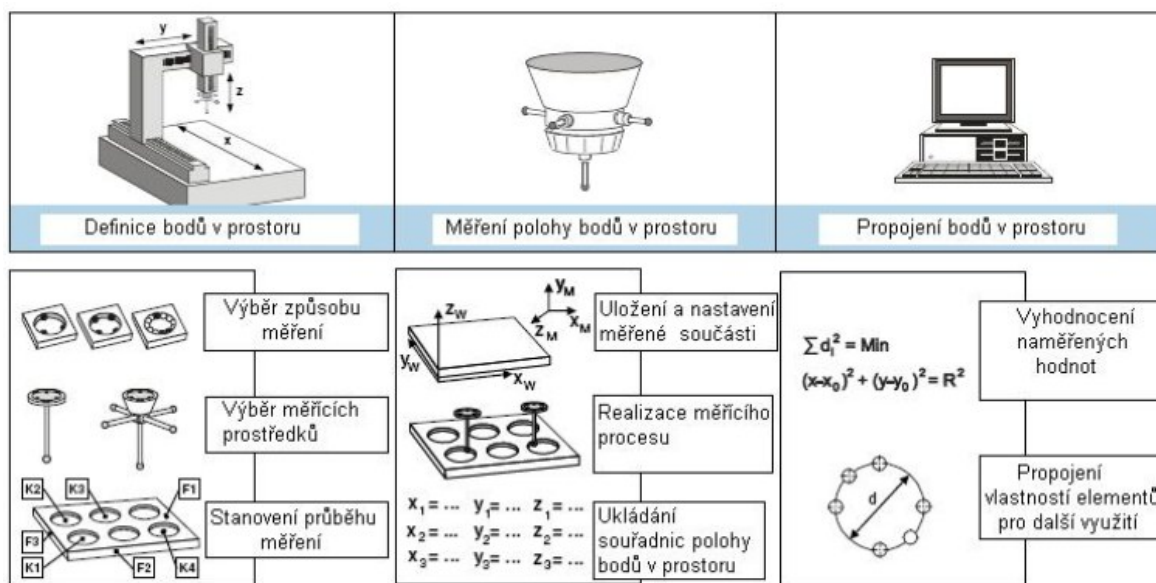
- **dotykové měření** - Dotyková spínací sonda se na zvolených místech dotýká povrchu součástí. Souřadnice jednotlivých bodů dotyku jsou zaznamenávány do měřicího softwaru, kde jsou následně vyhodnoceny.
- **kontaktní skenování** - Sonda se při měření pohybuje bez přerušení po měřeném povrchu, do softwaru se zaznamenává celá trajektorie měřicího dotyku.
- **bezkontaktní měření** (vyhodnocování obrazu) - Obraz je snímán CCD kamerou a následně vyhodnocen měřicím softwarem – viz mikroskopy
- **bezkontaktní skenování** (laser) - Laserová skenovací hlava se pohybuje nad měřeným povrchem. Přitom na něj vysílá kmitající paprsek, který se odráží od měřeného povrchu zpět na snímač v laserové hlavě. Díky velké rychlosti kmitání paprsku jsou nasnímaných bodů řádově miliony a uživatel zařízení tak získá téměř dokonalou informaci o tvaru povrchu součásti. [3]

5.2.1 Měření rozměrů vnějších a vnitřních

Dle obrázku níže je jasné, že měřicí proces se skládá ze tří důležitých částí. V první části se jedná o definici bodu měřicího zařízení v prostoru. Této oblasti se týká výběr vhodného způsobu měření, výběr vhodných měřicích prostředků (sondy a její doteky) a nakonec stanovení vhodného průběhu měření, aby měření bylo co nejpresnější a nejefektivnější. [10]

Druhá část se týká vlastního zkušební vzorku. V této oblasti dochází k jeho upnutí k měřicímu stolu měřicího zařízení, vlastní realizaci měření jednotlivých bodů na dané součásti a také ukládání informací pro určení vlastní polohy bodu zkušební vzorku. [10]

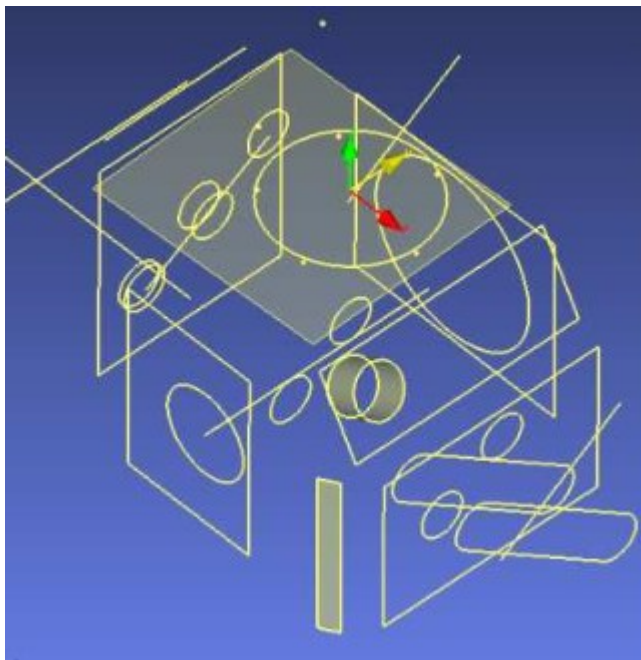
V poslední části se jedná o práci s uloženými informacemi, zejména jejich interpretaci vyhodnocení naměřených hodnot a další využití získaných informací. Díky těmto informacím lze pak získat informace /přímo nebo přepočtem) o základních vlastnostech měřeného vzorku. [10]



Obr. 4.5 Princip měření [3.1]

5.2.2 Měření úchylky tvaru a polohy

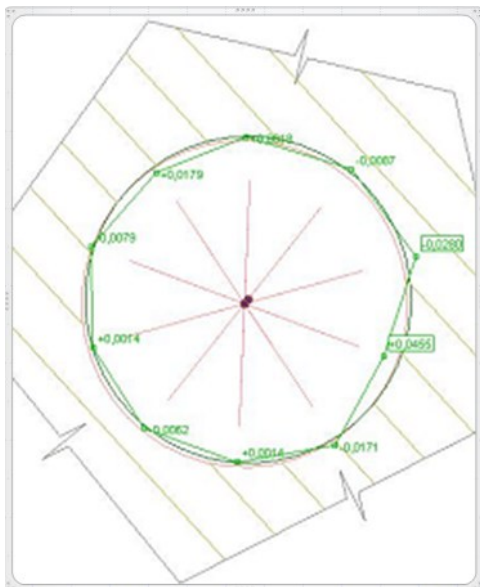
Na základě polohy vybraných bodů, které nám software měřicího stroje generuje, je možno vytvořit základní geometrické tvary. Těmi jsou např. kružnice pomocí tří a více bodů zastupující otvory, přímky zastupující hrany nebo roviny zastupující plochy součástí (viz obr. 4.6). Na základě známých tvarů je pak možno mezi nimi stanovovat potřebné úchylky tvaru a polohy.



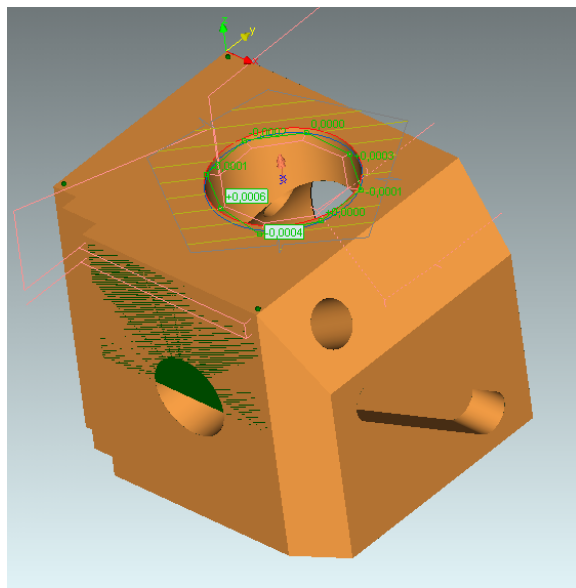
Obr. 4.6 Pomocné geometrické tvary [3.2]

Pokud jsou body nasnímány na některém z běžných geometrických prvků např. kruhový otvor, proloží měřicí software těmito body ideální geometrický tvar měřeného objektu (v tomto případě kružnici nebo válec) jehož rozměry a polohu porovná s rozměry a polohou jmenovitého útvaru vyskytujícího se na modelu. Z naměřených bodů je software schopen určit odchylku skutečného tvaru měřeného objektu od ideálního (viz obr. 4.7). Úchylka skutečného tvaru od ideálního se vyhodnotí jako součet vzdáleností dvou naměřených bodů, které leží nejdále od ideální hranice útvar.

V případě měření s CAD modelem (viz obr. 4.8) je nutné nejprve sesouhlasit souřadné systémy reálné součásti a CAD modelu.

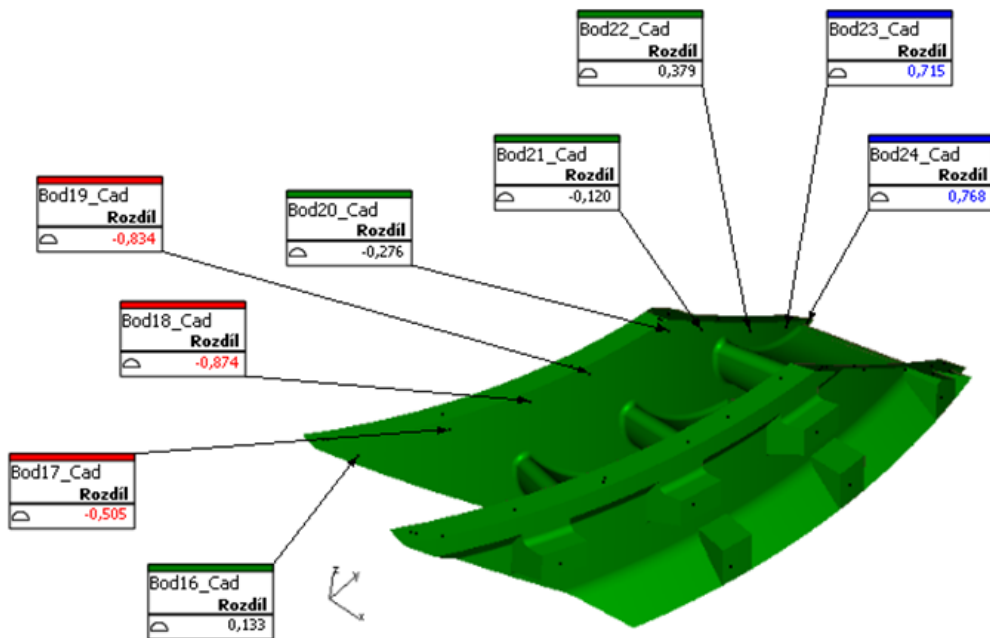


Obr. 4.7 Princip měření [3.3]



Obr. 4.8 Porovnání s CAM modelem [3.3]

Výsledný protokol takovéto naměřené součásti často vypadá jako výkres součásti nebo 3D model s odkazy od jednotlivých měřených míst k číselné hodnotě odchylky (viz obr. 4.9).

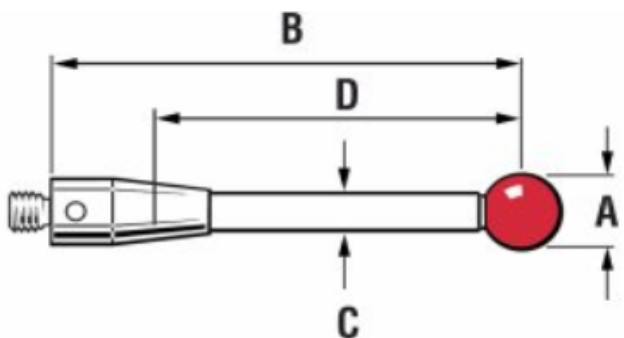


Obr. 4.9 Protokol měření [3.4]

5.3 Stanovení vhodné metody měření

Při volbě vhodné měřicí metody a podmínek měření se musí technolog řídit hledisky technickými i ekonomickými. Náklady na kontrolní operace jsou jedním z důležitých kritérií při volbě kontrolní metody. Náklady spojené s kontrolou se skládají z nákladů na pořizovací cenu měřicího zařízení, údržbu nebo různé režie laboratoře. [10]

U většiny součástí se kontrolují jen vybraná místa, která mají bezprostřední vliv na funkci součásti. Proto většinou postačí cenově dostupná dotyková sonda (viz obr. 5) a software umožňující porovnání s CAD modelem. Jsou však takové součásti, kde nás zajímá spíše tvar, než jednotlivé rozměry, pak je na místě pořízení dražšího přístroje. [10]



Obr. 5 Měřicí sonda [3.5]

Pozn. A – průměr kuličky, B – Celková délka, C – Průměr dřívku, D – Efektivní činná délka

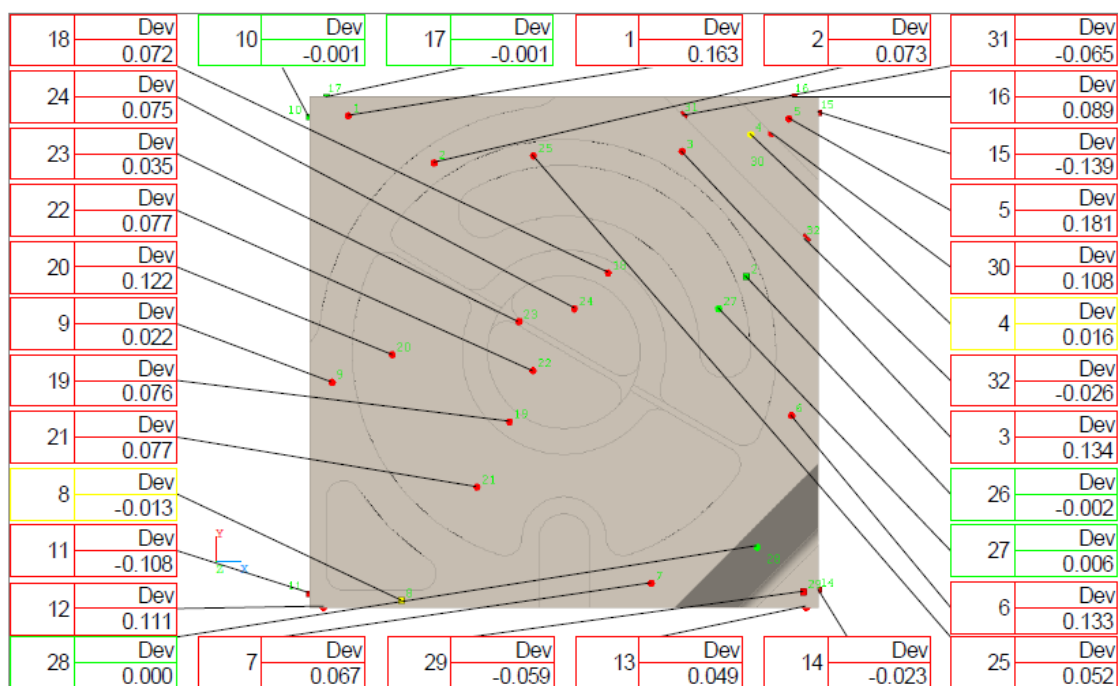
- Pro co nejlepší a nejpresnější výsledky měření by se měly používat co nejkratší doteky. Čím větší délka doteku je, tím více se může ohýbat a tím se snižuje přesnost měření.
- Dále je potřeba užití co nejmenšího počtu spojů, protože je každý spoj potenciálním zdrojem deformací, a tudíž chyby měření.
- Průměr kuličky by se měl používat co největší. Čím větší je mezera mezi kuličkou a stopkou doteku, tím menší je možnost chybných sepnutí způsobených kolizí stopky s dílcem. Díky většímu průměru kuličky se musí zvýšit průměr stopky a tím se zvýší tuhost doteku.

Existuje několik druhů doteků, lišících se dle konstrukce a vhodnosti pro dané aplikace. Jedná se zejména o doteky přímé, hvězdicové, bodové a další. [10]

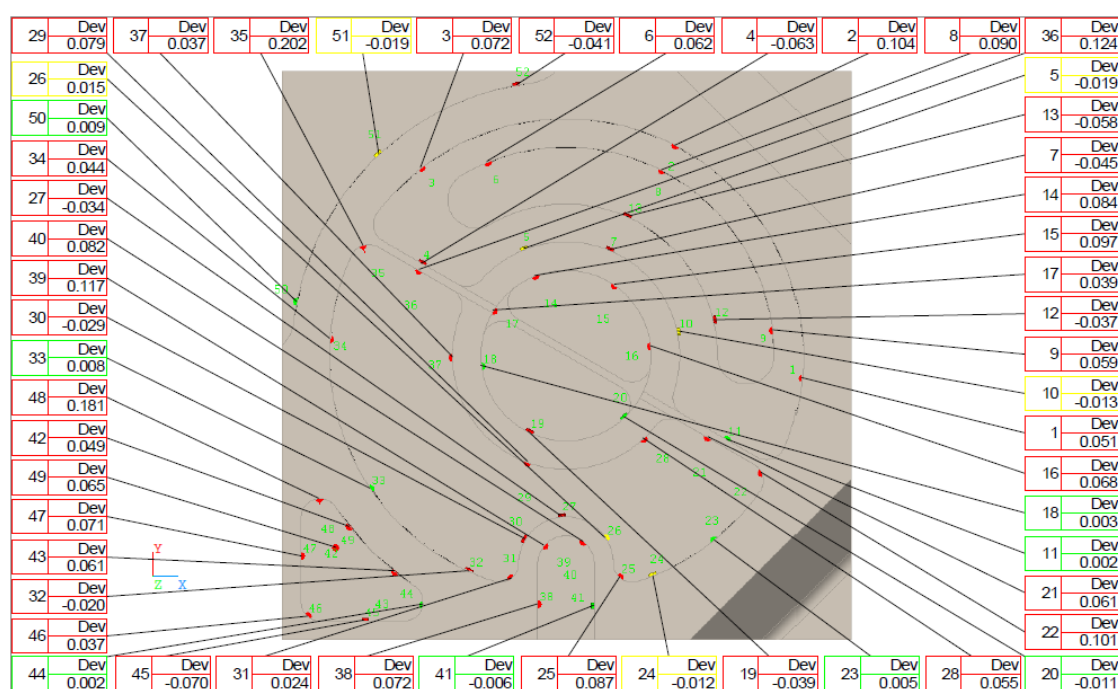
6. Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

6.1 Měřené plochy obrobku

Na experimentálních dílech byly pomocí souřadnicového měřicího stroje měřeny body na jednotlivých plochách potřebné ke zjištění odchylky vzdáleností obrobených ploch od daných rozměrů předepsaného modelu (viz příloha A).



Obr. 5.1 Ukázkový rozbor výškových úchylek měřených na obrobené části systému



Obr. 5.2 Ukázkový rozbor bočních úchylek měřených na obrobené části systému

6.2 Naměřené hodnoty

Zpracované hodnoty odchylek udávané ve vzdálenosti od ideálního tvaru jednotlivých CAM systémů jsou uvedeny v Tab. 3 a 4. Čím bližší je odchylka nule, tím světlejší je barva. Pro srovnání byly vynechány odchylky měřené na čelní (nejvyšší) ploše a bočních plochy, protože se jedná o plochy frézovaného polotovaru čelním frézováním. Odchylky byly vybrány pouze ty, kterých se progresivní frézování týkalo.

Tab. 3 Naměřené hodnoty odchylek výškových (měřené v ose Z)

						edgcam	featurecam	solidcam	surfcam	worknc
	EdgeCAM	FeatureCAM	SolidCAM	SurfCAM	WorkNC					
1	-0,117	0,036	-0,015	0,163	0,203	3	4	5	2	1
4	-0,119	-0,007	-0,087	0,016	0,127	2	5	3	4	1
5	-0,146	0,028	-0,051	0,181	0,159	3	5	4	1	2
18	-0,107	0,02	-0,076	0,072	0,14	2	5	3	4	1
19	-0,138	-0,019	-0,073	0,076	0,149	2	5	4	3	1
20	-0,113	0,013	-0,047	0,122	0,188	3	5	4	2	1
21	-0,185	-0,039	-0,061	0,077	0,158	1	5	4	3	2
22	-0,129	-0,006	-0,055	0,077	0,151	2	5	4	3	1
23	-0,119	0,012	-0,071	0,035	0,154	2	5	3	4	1
24	-0,137	0,014	-0,068	0,075	0,148	2	5	4	3	1
25	-0,121	0,049	-0,089	0,052	0,158	2	5	3	4	1
26	-0,144	0,01	-0,084	-0,002	0,131	1	4	3	5	2
27	-0,166	-0,063	-0,019	0,006	0,138	1	3	4	5	2
28	-0,108	-0,031	-0,034	0	0,058	1	4	3	5	2
29	-0,143	-0,079	-0,064	-0,059	0,118	1	3	4	5	2
30	0,055	0,045	0,117	0,108	0,057	4	5	1	2	3
31	0,052	0,057	0,052	-0,065	0,002	4	3	4	2	5
32	-0,022	-0,034	0,07	-0,026	-0,031	5	2	1	4	3
					suma:	41	78	61	61	32
					vyhodnocení:	3	1	2	2	4

Tab. 4 Naměřené hodnoty odchylek bočních ploch (měřené v ose X a Y)

						edgcam	featurecam	solidcam	surfcam	worknc
	EdgeCAM	FeatureCAM	SolidCAM	SurfCAM	WorkNC					
1	0,03	0,004	0,046	0,051	0,078	4	5	3	2	1
2	0,032	0,047	0,07	0,104	0,056	5	4	2	1	3
3	0,029	0,061	0,096	0,072	0,052	5	3	1	2	4
4	0,108	0,111	0,011	-0,063	0,006	2	1	4	3	5
5	0,027	0,007	0,015	-0,019	0,046	2	5	4	3	1
6	0,024	0,035	0,058	0,062	0,038	5	4	2	1	3
7	0,02	0,015	0,018	-0,045	0,022	3	5	4	1	2
8	0,043	0,025	0,04	0,09	0,046	3	5	4	1	2
9	0,038	-0,001	-0,008	0,059	0,055	3	5	4	1	2
10	0,019	0,04	0,037	-0,013	0,016	3	1	2	5	4
11	-0,046	-0,066	0,061	0,002	0,069	4	2	3	5	1
12	-0,003	0,041	-0,023	-0,037	-0,006	5	1	3	2	4
13	0,002	0,019	-0,039	-0,058	0,004	5	3	2	1	4
14	0,055	0,054	0,101	0,084	0,044	3	4	1	2	5
15	0,048	0,029	0,082	0,097	0,058	4	5	2	1	3
16	0,053	0,01	0,055	0,068	0,064	4	5	3	1	2
17	0,036	0,061	0,08	0,039	0,038	5	2	1	3	4
18	0,043	0,048	0,062	0,003	0,023	3	2	1	5	4
19	0,041	0,018	0,048	-0,039	0,029	2	5	1	3	4
20	0,046	-0,007	0,025	-0,011	0,051	2	5	3	4	1
21	0,1	0,109	0,031	0,061	-0,248	3	2	5	4	1
22	0,125	0,115	0,06	0,101	0,089	1	2	5	3	4
23	0,035	-0,003	0,049	0,005	0,069	3	5	2	4	1
24	0,027	-0,002	0,042	-0,012	0,062	3	5	2	4	1
25	-0,025	-0,04	0,124	0,087	0,152	5	4	2	3	1
26	-0,059	-0,057	0,061	0,015	0,055	2	3	1	5	4
27	0,014	0,003	0,021	-0,034	0,04	4	5	3	2	1
28	0,017	0,05	0,041	0,055	0,02	5	2	3	1	4
29	0,009	0,025	0,031	0,075	0,03	5	4	2	1	3
30	0,094	0,068	-0,01	-0,029	0,017	1	2	5	3	4
31	0,115	0,094	0,045	0,024	0,095	1	3	4	5	2
32	0,022	0,016	0,058	0,02	0,059	3	5	2	4	1
33	0,059	0,048	0,079	0,008	0,059	3	4	1	5	3
34	0,061	0,065	0,096	0,044	0,062	4	2	1	5	3
35	-0,015	0,009	0,145	0,202	0,146	4	5	3	1	2
36	-0,045	-0,055	0,077	0,124	-0,245	5	4	3	2	1
37	0,013	-0,013	0,006	0,037	0,04	4	4	5	3	2

38	-0,056	-0,058	0,108	0,072	-0,005	4	3	1	2	5
39	-0,007	-0,007	0,113	0,117	0,018	5	5	3	2	4
40	0,102	0,09	0,057	0,082	0,013	1	2	4	3	5
41	0,137	0,119	-0,001	-0,006	0,008	2	1	5	4	3
42	-0,002	-0,004	0,012	0,049	0,023	5	4	3	1	2
43	0	0,012	0,012	0,061	0,022	5	4	4	2	3
44	0,171	0,144	-0,01	0,002	0,065	1	2	4	5	3
45	0,129	0,106	0,018	-0,07	0,012	1	2	4	3	5
46	0,132	0,07	0,11	0,037	0,115	1	4	3	5	2
47	-0,022	-0,03	0,124	0,071	0,08	5	4	2	1	3
48	-0,017	-0,052	0,136	0,181	0,187	5	4	3	2	1
49	-0,118	-0,03	-0,048	0,065	0,197	2	5	4	3	1
50	0,005	-0,015	-0,004	0,009	0,027	4	2	5	3	1
51	0,01	-0,008	0,001	-0,019	-0,075	3	4	5	2	1
52	0,011	-0,002	0,009	-0,041	0,037	3	5	4	1	2
suma:						175	184	153	141	138
pořadí:						2	1	3	4	5

6.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

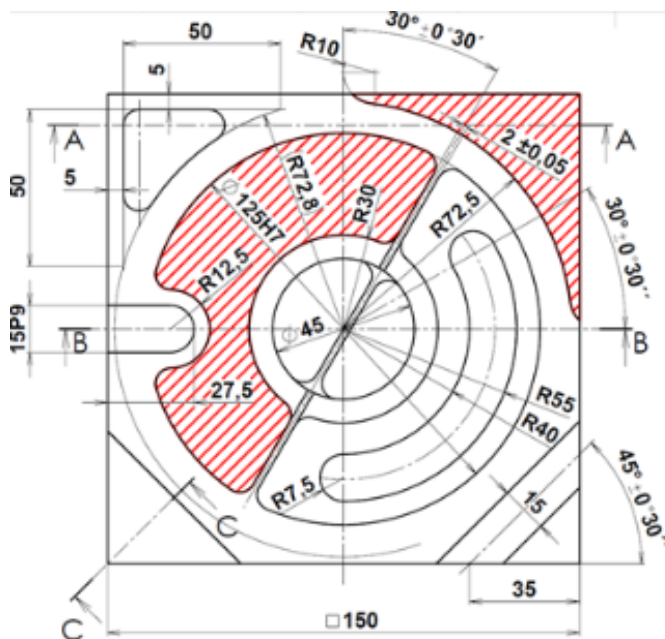
Vyhodnocení naměřených hodnot z hlediska rozdílu obrobenej součásti od ideálního tvaru bylo provedeno přiřazováním číselné stupnice od jedné do pěti dle toho, na jakém pořadí se určitá odchylka v obráběném místě umístila (pravá část Tab. 3 a 4). V případě těchto hodnocení bylo přiřazeno největší číslo nejpresnější odchylce. Následná suma bodů pro jednotlivé CAM systémy a následná největší hodnota pak naznačí, který z použitých systémů plní požadavky z tohoto pohledu nejlépe (Tab. 5).

Tab. 5 Srovnání jednotlivých systémů

	EdgeCAM	FeatureCAM	SolidCAM	SurfCAM	WorkNC
Σ bodů výškových odchylek:	41	78	61	61	32
pořadí:	3	1	2	2	4
průměrná odchylka [mm]:	0,118	0,031	0,063	0,067	0,126
Σ bodů vnitřních odchylek:	175	184	153	141	138
pořadí:	2	1	3	4	5
průměrná odchylka [mm]:	0,048	0,043	0,052	0,054	0,061

Z hlediska tohoto postupu vyhodnocení je zřejmé, že největší suma výškových odchylek a tím nejčastěji nejmenším odchylkám obrobenej ploch připadá na obrobek, programovaný v systému FeatureCAM se 78 body. Nejvzdálenější odchylky byly u systému WorkNC se 32 body, což je téměř dvakrát horší.

Jde to posoudit na první pohled z toho, že se odchylky na měřeném díle obroběným NC kódem generovaným v systému WorkNC ve více než polovině hodnot pohybovaly jednu desetinu v kladné hodnotě. Zatímco u systému FeatureCAM byla průměrná odchylka 0,031 mm a to i na obroběných plochách vysoce efektivním obráběním. (viz obr. 5.3). Ty jsou pro FeatureCam označeny v tabulce odchylek pod pořadovým číslem (1, 20, 21).

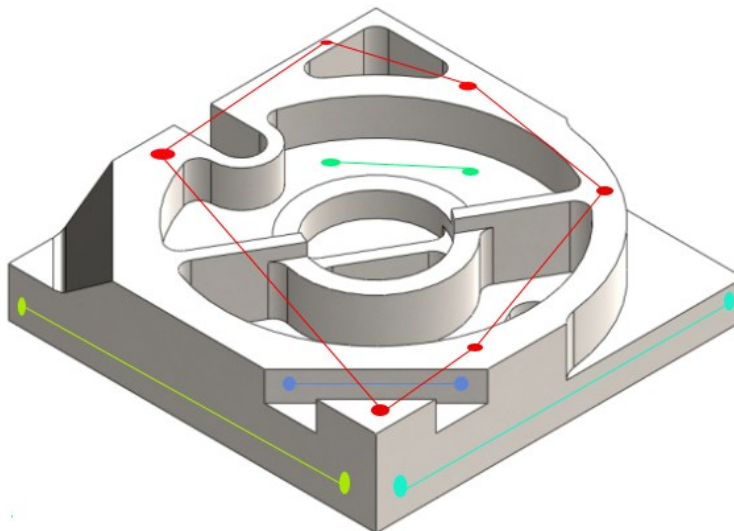


Obr. 5.3 Plochy obroběné progresivním frézováním

Se shodnými výsledky skončily díly obroběné NC kódem generovaným v softwarech SolidCAM a SurfCAM 61 bodů přičemž přesnější průměrné hodnoty dosáhl software SolidCAM. Odchylky obroběných dílů NC kódem generovaným v aplikacích SolidCAM a Edgecam jsou konstantně záporné, a je pravděpodobné, že příčinou bylo otupení nástroje.

Odchylky radiálních ploch rozdílné příliš nejsou. Přesnost těchto stěn obroběných převážně boční stranou frézy se pohybuje od čtyř do šesti setin milimetru. Nejpresnější hodnoty byly naměřeny v tomto případě opět na měřeném díle obroběným NC kódem generovaným v systému WorkNC se 184 body a průměrnou odchylkou 0,042 mm. Nejvzdálenější odchylky byly u systému WorkNC se 138 body a průměrnou odchylkou 0,061 mm, což je rozdíl podstatně menší než v prvním případě.

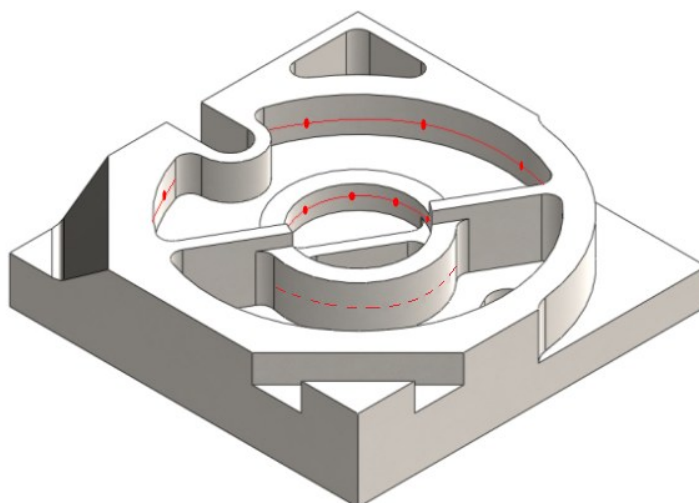
Pomocí těchto třiceti naměřených hodnot lze všeobecně zhodnotit tvar obrobene součásti jak z hlediska vzdálenosti výsledné od nulové, tak i například přímosti pomocí párů dvou bodů, rovinnosti pomocí tří bodů rovině (viz obr 5.4) nebo kruhovitosti.



Obr. 5.4 Barevné označení párových bodů

Pro přesnější výsledky měření tvarových odchylek přímostí a rovinností je nutné zaznamenání větší hustoty bodů na ploše. Proložení roviny těmito body a následného zjištění největší vzdálenosti této roviny od skutečného tvaru by vznikla tvarová úchylka rovinnosti. Stejným postupem by se zjišťovala úchylka přímosti a jiné.

Pro zjištění odchylek kruhovitosti (Tab. 6) obrobenech dílů byla naměřena větší hustota bodů na kruhovém vybrání (viz obr. 5.5).

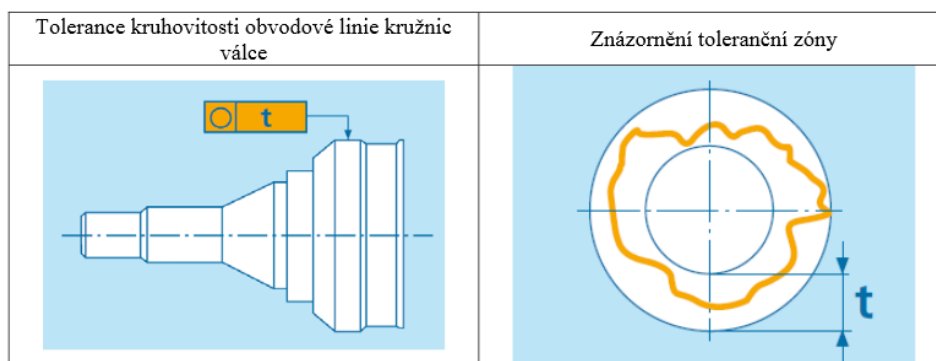


Obr. 5.5 Znázornění bodů kruhovitosti

Tab. 6 Porovnání odchylek kruhovitosti

Ø125	EdgeCAM	FeatureCAM	SolidCAM	SurfCAM	WorkNC
maximální odchylka:	0,061	0,065	0,096	0,104	0,078
minimální odchylka:	0,022	-0,003	0,042	-0,012	0,052
celková odchylka [mm]:	0,039	0,068	0,054	0,116	0,026
Ø45					
maximální odchylka:	0,055	0,061	0,101	0,097	0,064
minimální odchylka:	0,036	-0,007	0,025	-0,039	0,023
celková odchylka [mm]:	0,019	0,068	0,076	0,136	0,041

Rozměr průměru 125 mm, který je na výkrese kótován s označením tolerance H7 má toleranční pole jednotné díry velikost od 0 do +0,04 mm. Pokud by měřené hodnoty nebyly pouze místními odchylkami, této tolerance by nedosáhl ani jeden obrobek (viz obr. 5.6).



Obr. 5.6 Ukázka parametru kruhovitosti a jeho značení [3.6]

Závěrečné hodnocení je zaměřeno na čas obrábění jednotlivých kusů. Jde o informativní aspekt, díky kterému si lze vytvořit představu, jak složité jednotlivé strategie z hlediska obráběcích trajektorií jsou. Časový aspekt může být závislý na velikosti opotřebení, proto s ním nemůžeme samostatně pracovat.

Nejkratší obráběcí čas měl systém WorkNC 28 min. Je pravděpodobné, že tato krátká doba může mít vliv na kvalitu měřených ploch, díky kterým se tento CAM systém umístil jako poslední. Krátký strojní čas také může ovlivnit opotřebení nástroje, které hraje při dosažení optimálního obrobku a jeho přesnost významnou roli. Naopak nejdelší obráběcí cyklus byl proveden systémem FeatureCAM, který se ve srovnání přesností obrobků umístil na prvním místě. Středem byl systém SolidCAM, který měl velikosti odchylek částečně menší než FeatureCAM s obráběcím časem 38 min. Zbýlými systémy jsou EdgeCAM s délkou obrábění 30 min a SurfCAM 52 min.

Závěr

Ukázky jednotlivých CAM systémů podporujících modulární nastavbu progresivního frézování poskytla náhled na to, kolik společných vlastností tyto strategie mají. Přesto, že jsou nastavby systémů svými vlastníky často patentované, jednotlivé směry, kterými se ubírají, jsou ve srovnání podobné.

Z hlediska měření výškových parametrů a bočních ploch dosahoval nejlepších výsledků systém FeatureCAM a nejhůře systém WorkNC jehož průměrná odchylka činila v obou případech největší hodnotu. Nejmenšího rozdílu maximální a minimální odchylky kruhovitosti dosáhl systém EdgeCAM systém WorkNC.

Vyhodnocení nejlepšího z nich je problematické díky určitým faktorům. Takovými aspekty jsou snížení obráběcího času na úkor opotřebení frézovacího nástroje, které nejsou v této práci zahrnuty. Dalšími jsou zkušenosti samotné obsluhy, každý programátor zastupující svůj systém vnese do strategie obrábění kromě generovaných drah a řezných podmínek CAM systémem i něco z vlastních zkušeností.

Ideálního výsledku by bylo možno dosáhnout propojením přesnosti obrobeneho povrchu stejně zkušenou obsluhou s porovnáním velikosti opotřebení nástrojů jednotlivých obráběcích systémů a nakonec časem obrábění.

Pro následovné řešení této problematiky v dalších pracích jsou známy výsledky porovnání přesností kusů. Těmi jsou pozitivní vliv systému FeatureCAM na odchylování-se pomocí progresivního frézování od zadaných rozměrů. Kombinací odchylek a pracovních času je ideální systém SolidCAM.

Není jednoduché porovnávat efektivní strategie v rámci jednoho experimentu. Rád bych se proto této problematice věnoval v budoucnu se zapojením výsledků opotřebení nástrojů po využití na jednotlivých progresivních strategiích, které hrají v této problematice podstatnou roli nebo další důležité aspekty. Těmi mohou být měření sil, vibrací nebo měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Pagáčovi za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. Dále bych rád poděkoval celému realizačnímu týmu, který se podílel na vytvoření odborného semináře a poskytl tak podklady pro zpracování této práce.

Seznam použité literatury

Publikace:

- [1] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008, 2 sv. ISBN 978-80-248-1822-12.
- [2] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I* [online]. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 183 s. [cit. 2014-05-13]. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-80-214-4010-4.

Elektronické zdroje:

- [4] SADÍLEK, PH.D. *Počítačová podpora výroby* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2011[cit. 2014-05-05]. CZ.1.07/2.3.00/09.0 147. Dostupné z: <http://www.346.vsb.cz/Po%C4%8D%C3%ADta%C4%8Dov%C3%A1%20podpora%20v%C3%BDroby.pdf>
- [5] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak dosáhnout vysoké produktivity při frézování. [online]. 2013, s. 1 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.cneckonstrukce.cz/clanek-118/prirucka-pro-technology-jak-dosahnout-vysoke-produktivity-pri-frezovani.html>
- [6] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Dynamické frézování - využití kompenzačního přístupu. [online]. 2013, s. 1 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-dynamicke-frezovani-vyuziti-kompenzacniho-pristupu.html>
- [7] SADÍLEK, PH.D., Doc. Ing. Marek. Vyspělé strategie ve 3D frézování. [online]. 2004, s. 1 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/vyspele-strategie-ve-3d-frezovani.html>
- [8] PAGÁČ, Ing. Marek. Počítačová podpora progresivních strategií: Konstrukce součástí. In: [online]. 2012 [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.prumysl.cz/pocitacova-podpora-progresivnich-frezovacich-strategii-vzbudila-velky-ohlas-1-cast/>
- [9] DVOŘÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálů obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, 2009. Počet stran 109, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

[10] DOLÁK, D. Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Opl.